

Stabilité au verrage de résistances ajustées - résultats préliminaires

Etude préliminaire de l'effet du processus de verrage (ESL G-481, env. 600°C) sur des résistances Du Pont 2041 ajustées au laser à env. 2x leur valeur initiale, en fonction de la géométrie, des terminaisons et de la puissance du laser.

Vorstudie des Einflusses der Verglasung (ESL G-481, ca. 600°C) auf Du Pont 2041 Widerstände, die auf 2x ihrer Anfangswert getrimmt waren, in Abhängigkeit der Widerstandsgeometrie, der Terminierungen und der Laserleistung.

Thomas Maeder, 9.1.2001

Projets: TEPLAZID - ajustement.

Mots-Clefs: ajustement capteurs, stabilité, trim, découpe laser, verrage.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	2
3. Résultats	5
4. Conclusions	14

Résumé

La stabilisation d'un ajustement grossier par verrage (ESL G-481, cuisson vers 600°C) est possible sans trop en affecter la qualité, mais requiert un réglage assez fin de la puissance laser. Une puissance trop faible entraîne un "comblement" électrique de la coupe lors du passage dans le four. Inversement, une puissance trop élevée endommage la résistance et entraîne une croissance ultérieure de sa valeur. L'effet de cet endommagement peut en revanche être minimisé en utilisant des résistances relativement grandes et des coupes peu agressives.

Kurzfassung

Die Stabilisierung eines Grobabweichs mit Schutzglas (ESL G-481, Einbrand um 600°C), ohne aber die Qualität des Abgleichs allzusehr zu beeinträchtigen, erwies sich als möglich. Die Laserleistung muss aber relativ fein eingestellt werden. Ist sie zu niedrig, "schliesst" sich elektrisch der Trimmchnitt während dem Ofendurchlauf, ein Effekt, der durch das Glas verursacht wird. Ist dagegen die Laserleistung zu hoch, wird der Widerstand beschädigt, und sein Wert wächst während dem Ofendurchlauf. Dies kann aber durch den Einsatz relativ grösser Widerstände und wenig aggressiver Trimmchnitte minimisiert werden.

1. Introduction

Afin de protéger les résistances hybrides, on utilise dans la plupart des cas des couches protectrices. Celles-ci consistent habituellement en des *verrages*, c'est-à-dire des couches de verre mises en œuvre à basse température (500–600°C).

Si des résistances doivent être ajustées par découpe laser, elles le sont usuellement après déposition du verrage, car un nouveau passage dans le four lors de la cuisson du verrage modifie leur valeur. Cependant, cette manière de faire laisse la zone coupée dans un état relativement instable : le matériau constituant la résistance est microfissuré et sous contrainte, et la coupe ouvre une brèche dans la couche protectrice rendant la résistance sensible aux influences de l'environnement extérieur. Pour l'ajustement de ponts de mesure, la stabilité résultante peut être insuffisante. C'est pourquoi on veut mettre la couche de verrage *après* l'ajustement grossier du pont.

On suppose que cette manière de faire stabilise fortement la découpe de la résistance. Cependant, on doit assurer que la découpe se comporte au verrage comme une résistance non ajustée ; pour que cette méthode soit utile, l'ajustement réalisé doit rester en grande partie valable après verrage. Des essais préliminaires sur les poutres *MilliNewton* (1^{ère} version) montrent que ce n'est malheureusement pas forcément le cas.

- Si la puissance laser est trop faible, l'ajustement se "referme", et la résistance tend à revenir à la valeur non ajustée.
- Si la puissance laser est trop élevée, on a au contraire une amplification de l'ajustement : le pont est alors sur-ajusté.

Cette étude préliminaire vise à établir grossièrement les conditions optimales d'ajustement + verrage, avec un ensemble relativement hétéroclite d'échantillons. Ces résultats serviront ensuite à fixer les conditions et le programme expérimental pour une étude plus systématique.

2. Expériences

Substrats

Les substrats sont en alumine "standard" 96% (Kyocera A-476, Haldemann & Porret), d'épaisseur 0.64 mm.

Circuit et pâtes

Le circuit "*test patterns*" est utilisé ici. Il a comme caractéristiques principales:

- Largeur de résistances 0.6 et 1.5 mm.
- Longueur de résistances 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.5 et 5.0 mm.
- 2 niveaux (a et b) de conducteurs (terminaisons des résistances), usuellement AgPd et Au.
- 4 zones équivalentes par substrat = 4 ($8 = 4 * 2$ pour la longueur 0.8 mm) résistances nominale-ment identiques par substrat.

Dans le cadre de cette étude préliminaire, des vieux substrats avec résistances séchées ont été "recyclés". On doit donc s'attendre à une certaine dispersion des résultats, car certaines résistances sont légèrement endommagées.

Les terminaisons "standard" Du Pont (DP) et ESL ont été utilisées dans la plupart des cas, à savoir DP 5104 (Ag: Pd 3:1) ou ESL 9635B (Ag: Pd 3:1) comme terminaison a, et DP 5744 (Au) ou ESL 8837 (Au fin) comme terminaison b. Dans un cas, des conducteurs riches en Ag, ESL 9912 (Ag) et ESL 9695 (Ag: Pd 25:1) ont été testés en tant que terminaisons.

Cette étude porte essentiellement sur la composition résistive DP 2041, déposée avec différentes épaisseurs (trames et émulsions). Dans un cas, on a aussi étudié le comportement de ESL 3984. Ces deux compositions résistives ont une valeur nominale de 10 k Ω .

Dans cette étude on a utilisé dans tous les cas ESL G-481 comme verrage.

Cuisson

Les substrats ont été cuits posés directement sur la bande du four Sierratherm de l'IPM (résistances vers le haut). Le profil standard « 30MN_PR » (tableau 2-II) a été utilisé pour les terminaisons et résistances (3 cuissons). Ce profil donne un pic d'env. 10 min à 850°C. Le verrage ESL G-481 a été cuit selon le profil "ESL_600" (env. 10 min à 590°C). Les réglages correspondants du four sont donnés au tableau 2-II ci-dessous.

Profil	Température nominale [°C]	Vitesse de bande [cm/min]	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]
30MN_PR	850	8.67	540	765	866	867	876	890
ESL_600	590	8.67	320	500	595	603	610	625

Tableau 2-II. Réglages du four Sierratherm pour les profils utilisés.

Echantillons et opérations

Les paramètres des 6 *test patterns* sont donnés au tableau 2-I, ainsi que la séquence des opérations ultérieures auxquelles ils ont été soumis. Dans la plupart des cas, on a étudié l'effet de séquence "TVF" envisagée pour la production, c'est-à-dire ajustement (T), puis déposition du verrage (V), puis passage dans le four (F) à env. 600°C selon profil "ESL 600".

Deux autres séquences ont été étudiées : celle utilisée normalement en production hybride (VFT, no 2, résistances ajustées après déposition du verrage) et celle consistant à passer les résistances au four sans verrage (TF, no 3). Cette dernière permet de différencier l'effet du traitement thermique de celui de l'interaction chimique entre la résistance ajustée et le verrage. Notons au passage que l'effet du verrage sur les résistances DP 2041 non ajustées a déjà été étudié¹.

No	Résistances (trame / émulsion en mesh / µm)	Terminaison A	Terminaison B	Séquence
1	ESL 3984 (200 / 30)	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)	ESL 8837 (Au fin)	TVF
2	DP 2041 (325 / 20)	DP 5104 (Ag:Pd 3:1)	ESL 8837 (Au fin)	VFT
3	DP 2041 (325 / 20)	DP 5104 (Ag:Pd 3:1)	DP 5744 (Au)	TF
4	DP 2041 (325 / 20)	DP 5104 (Ag:Pd 3:1)	DP 5744 (Au)	TVF
5	DP 2041 (200 / 30)	DP 5104 (Ag:Pd 3:1)	DP 5744 (Au)	TVF
6	DP 2041 (325 / 40)	ESL 9912 (Ag)	ESL 9695 (Ag:Pd 25:1)	TVF

Tableau 2-I. Liste des échantillons. T = ajustement (trim); V = déposition de verrage; F = passage au four.

Ajustement des résistances

Toutes les résistances ont été ajustées à 2x leur valeur, ce qui permet de mettre facilement en évidence une instabilité éventuelle de l'ajustement. Suivant la géométrie des résistances (longueur et largeur), différents types de coupes, schématisés à la fig. 2-1, ont été réalisés.

"I" : coupe simple à travers la résistance.

"I2", "I3" : plusieurs coupes alternées à travers la résistance.

"L" : coupe en L, à travers, puis le long de la résistance.

¹ Rapport "Effet de couches protectrices sur les résistances Du Pont 20x1", Thomas Maeder, 4.7.2000.

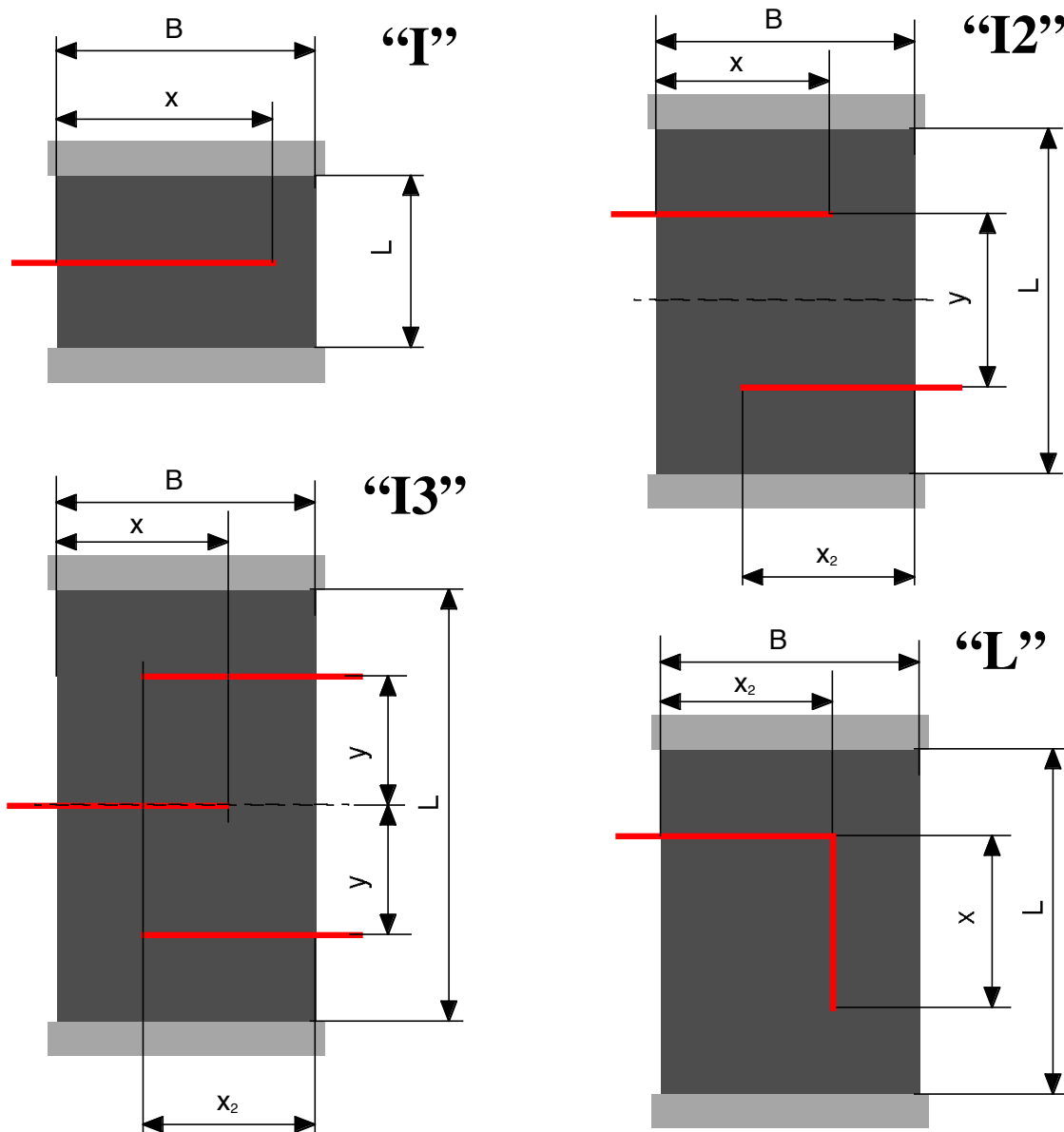


Fig. 2–1. Les différents types de coupe utilisés et leurs paramètres.

Le type et les paramètres de coupe sont donnés, pour chaque résistance, au tableau 2–III.

Nos	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Coupe	Paramètres (voir fig. 2–1) <i>x</i> varié pour atteindre la valeur désirée
R1-1 et R10-1	0.3	0.6	I	(coupe à mi-longueur)
R2-1 et R11-1	5.0	0.6	L	$x_2 = 0.4 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.3 \text{ mm}$
R3-1 et R12-1	0.4	0.6	I	(coupe à mi-longueur)
R4-1 et R13-1	1.0	0.6	I3	$x_2 = 0.3 \text{ mm}$; $y = 0.3 \text{ mm}$
R5-1 et R14-1	0.8	0.6	I2	$x_2 = 0.4 \text{ mm}$; $y = 0.4 \text{ mm}$
R6-1 et R15-1	1.5	0.6	L	$x_2 = 0.4 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.2 \text{ mm}$
R7-1 et R16-1	0.8	0.6	I2	$x_2 = 0.4 \text{ mm}$; $y = 0.4 \text{ mm}$
R8-1 et R17-1	0.6	0.6	I2	$x_2 = 0.35 \text{ mm}$; $y = 0.2 \text{ mm}$
R9-1 et R18-1	2.5	0.6	L	$x_2 = 0.4 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.3 \text{ mm}$
R1-2 et R10-2	0.3	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R2-2 et R11-2	5.0	1.5	L	$x_2 = 1.0 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.3 \text{ mm}$
R3-2 et R12-2	0.4	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R4-2 et R13-2	1.0	1.5	I2	$x_2 = 0.8 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.6 \text{ mm}$
R5-2 et R14-2	0.8	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R6-2 et R15-2	1.5	1.5	L	$x_2 = 1.0 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.2 \text{ mm}$
R7-2 et R16-2	0.8	1.5	L	x_2 à 98% valeur désirée ; $y = 0.2 \text{ mm}$
R8-2 et R17-2	0.6	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R9-2 et R18-2	2.5	1.5	L	$x_2 = 1.0 \text{ mm}$ (2/3 B) ; $y = 0.3 \text{ mm}$

Tableau 2-III. Type et paramètres de coupe pour chacune des 36 résistances que compte une des 4 zones d'un *test pattern*.

Les résistances Rx–1 ont une largeur de 0.6 mm et les Rx-2 une largeur de 1.5 mm.

Les résistances R1–x à R9–x ont les terminaisons a et les R10–x à R18–x ont les terminaisons b.

Sur chaque *test pattern*, il existe 4 zones équivalentes, dénommées A, B, C et D. Elles ont servi ici à étudier l'effet de la puissance du laser, exprimée en pourcentage de la puissance maximale (paramètre machine). Les mêmes puissances ont été appliquées à tous les échantillons, à savoir 40%, 35%, 45% et 50% pour les zones A, B, C et D respectivement.

3. Résultats

3.1. Variation au verrage des résistances non ajustées

La variation au verrage des résistances DP 2041 est donnée à la fig. 3–1, en fonction de la longueur des résistances, de leur largeur et de leurs terminaisons (a = Ag:Pd 3:1 ou b = Au). Ces valeurs peuvent servir de base aux comparaisons qui suivent, à quelques restrictions et précisions près.

- Les terminaisons ne sont pas toutes identiques. On peut cependant estimer que DP 5104 et ESL 9635B sont à peu près équivalents (Ag:Pd 3:1), et qu'il en va de même pour DP 5744 et ESL 8837 (Au). En revanche, il n'y a pas de référence pour ESL 9912 (Ag) et ESL 9695 (Ag:Pd 25:1).

- En plus de l'effet des terminaisons, il existe un effet dû à l'interdiffusion de la résistance avec le verrage (et éventuellement avec le substrat), et qui dépend donc de l'épaisseur. Cependant, on peut utiliser comme base pour le comportement des résistances plus épaisses (325 mesh / 40 μm) les résultats de l'étude antérieure¹ (lignes continues marquées * sur la fig. 3-1), qui montrent comme prévu une plus faible variation au recuit pour des résistances plus épaisses. Sur la base des résistances carrées, on estime les rapports entre les épaisseurs : $(325 / 40) : (200 / 30) : (325 / 20) \approx 1.9 : 1.7 : 1.0$. Il en ressort que 200 mesh / 30 μm est sensiblement identique à 325 / 40.
- Malheureusement, il n'existe pas à ce jour de référence pour les échantillons passés au four selon le profil verrage, mais sans verrage dessus. Il en va de même pour le processus de double verrage utilisé dans la fabrication de résistances chip (verrage, ajustement, et 2^{ème} verrage).
- On ne dispose de données que pour la série de compositions résistives DP 20x1.

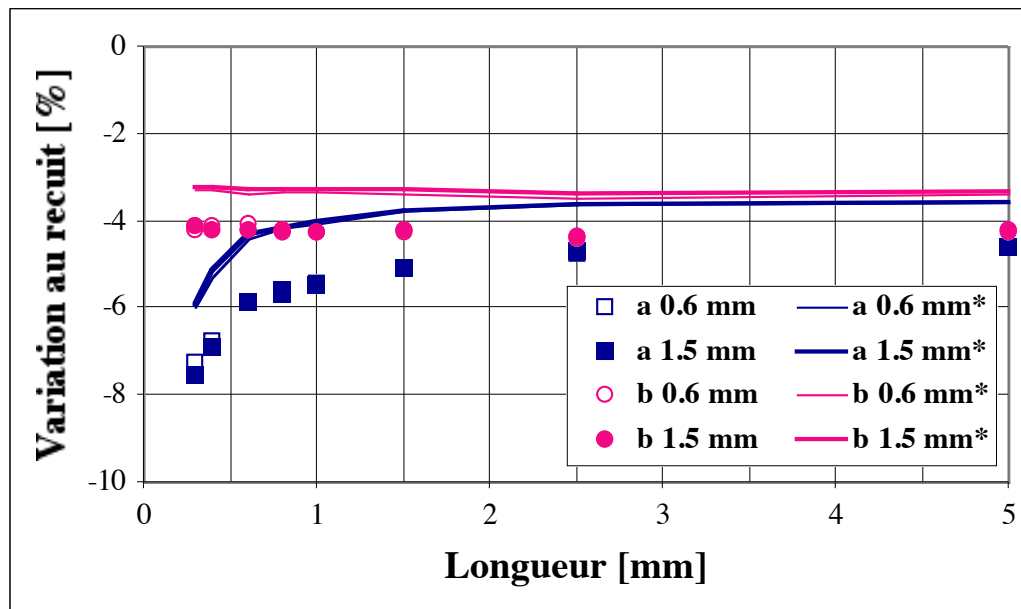


Figure 3-1. No 2 : variation, lors de la cuisson du verrage, des résistances non ajustées, en fonction de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.

Résistances : DP 2041 (325 mesh / 20 μm) ; a) DP 5104 (Ag:Pd 3:1) ; b) ESL 8837 (Au fin).

*: données¹ pour DP 2041 plus épais (325 / 40 μm), avec b) DP 5744 (Au) au lieu de ESL 8837.

3.2. DP 2041 ajusté : influence de l'épaisseur et des terminaisons.

Les échantillons no 4 et 5 (et 6 pour les résistances longues ne mettant pas en jeu les terminaisons) permettent d'évaluer le comportement à l'ajustement et verrage des résistances DP 2041 en fonction de leur épaisseur. Les variations relatives lors du passage au four sont données aux figures 3-2 (no 4, mince, env. 55% de l'épaisseur standard), 3-3 (no 5, env. 90% de l'épaisseur standard), et 3-4 (no 6, épaisseur standard, mais terminaisons différentes). On n'escompte pas d'effet de terminaison pour les résistances longues (2.5 et 5.0 mm).

Pour chaque épaisseur, il existe un domaine de puissance laser (vers 40–45%) où le comportement à l'ajustement de DP 2041 semble assez sain, si on tient compte de la mauvaise qualité des *test patterns* récupérés ; on retrouve des variations semblables à celles des résistances non ajustées (fig. 3-1), effets de terminaisons y compris pour les nos 4 et 5. Les terminaisons riches en Ag du no 6 semblent à première vue se comporter grosso modo comme Ag:Pd 3:1.

La dispersion des variations est cependant plus importante que dans le cas des résistances non ajustées. Visuellement, la qualité de la coupe est meilleure (plus nette, plus uniforme) sur les résistances minces. La puissance optimale augmente légèrement avec l'épaisseur de la résistance. Elle se situe vers 35–40% pour 325 mesh / 20 μm , 40–45% pour 200 mesh / 30 μm , et 45–50% pour 325 mesh / 40 μm .

Si la puissance est insuffisante, la coupe, bien qu'ayant visuellement une apparence assez propre, se "referme" électriquement lors de la cuisson du verrage pour des raisons encore inconnues. Dans certains cas, on atteint une réduction d'env. 50% de la valeur, ce qui annule essentiellement l'ajustement d'un facteur 2.

Inversement, si la puissance est trop importante, on observe une dispersion vers des valeurs plus positives des variations lors de la cuisson, surtout pour des coupes "agressives" sur des petites résistances. Les coupes en L sur les résistances longues semblent en revanche moins fortement affectées, ce qui indique que la pointe de la coupe est le facteur le plus critique.

3.3. DP 2041 : influence de la présence ou non de verrage lors du passage au four

On compare maintenant no 4 avec no 3, échantillon nominalelement identique hormis l'absence de verrage. Les résultats sont donnés aux figures 3–2 (no 4, verrage après ajustement) et 3–5 (no 3, passage au four sans verrage).

L'absence de verrage altère fortement le comportement au recuit :

- Pour les puissances trop faibles (35%), on observe une dispersion augmentée, vers le haut et un peu vers le bas. Il semble donc que la tendance de la coupe à se combler électriquement si la puissance laser est faible soit due à une interaction avec le verrage.
- Comme avec verrage, une puissance de 40% donne de bons résultats, avec une influence quasi nulle du passage au four sur la valeur des résistances longues.
- Pour des puissances trop élevées (45% et 50%), une dispersion importante vers le haut peut apparaître. Ces résultats doivent cependant être confirmés sur un plus grand nombre d'échantillons de meilleure qualité.

3.4. Comparaison entre DP 2041 et ESL 3984

L'évolution de DP 2041 et ESL 3984 (200 mesh / 30 μm , terminaisons Ag:Pd 3:1 et Au) après verrage des résistances ajustées à 2x leur valeur initiale est donnée aux figures 3–3 (DP 2041) et 3–6 (ESL 3984). Les deux compositions semblent pouvoir être ajustées, puis verrées moyennant des conditions adéquates.

Si la puissance de coupe minimale est semblable (env. 40%), ESL 3984 supporte mieux les fortes puissances (50%) que DP 2041. L'effet de terminaison avec Ag:Pd 3:1 est aussi différent : il apporte une contribution à la variation de la valeur lors de la cuisson qui est positive avec ESL 3984 et négative avec DP 2041. L'effet de terminaison avec Au est sensiblement nul dans les deux cas.

L'effet de terminaison observé sur DP 2041 correspond à celui observé sur les résistances non ajustées (fig. 3–1). Quant à ESL 3984, il n'existe à ce jour pas de données de référence.

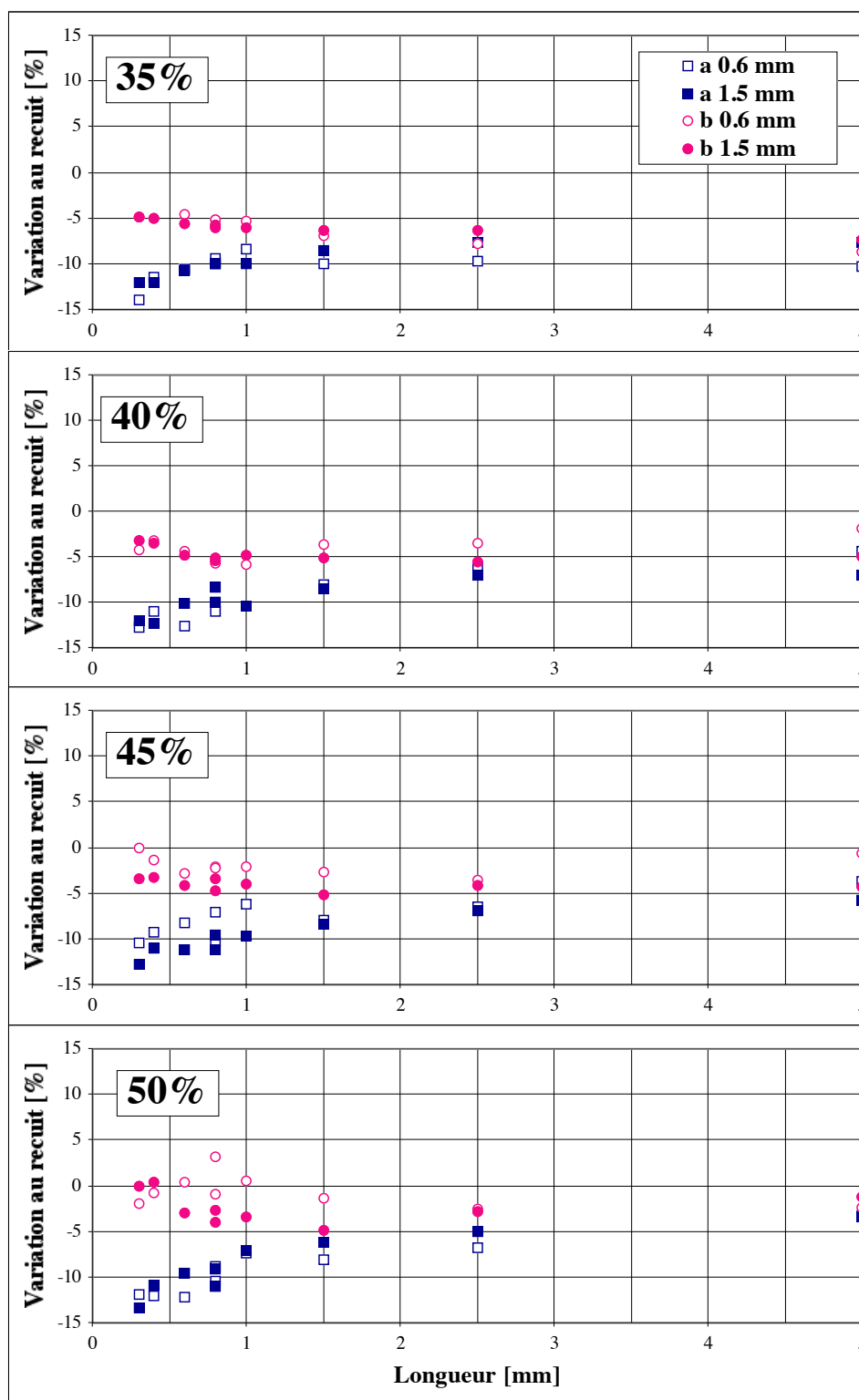


Figure 3-2. No 4 : variation, lors de la cuisson du verrage, des résistances ajustées, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
Résistances : DP 2041 (325 mesh / 20 μ m) ; a) DP 5104 (Ag: Pd 3:1) ; b) DP 5744 (Au).

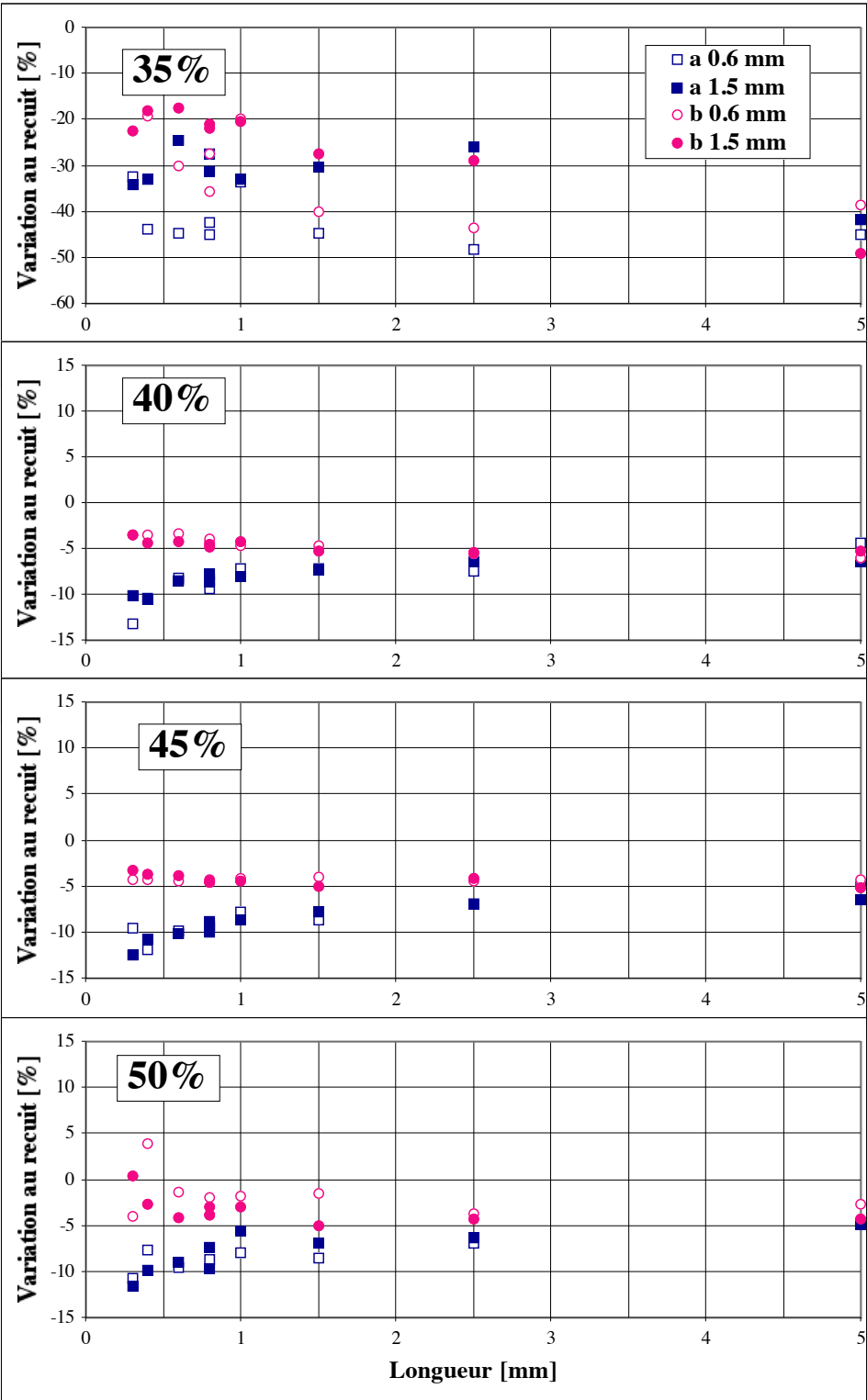


Figure 3-3. No 5 : variation, lors de la cuisson du verrage, des résistances ajustées, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
Résistances : DP 2041 (200 mesh / 30 μ m) ; a) DP 5104 (Ag: Pd 3:1) ; b) DP 5744 (Au).

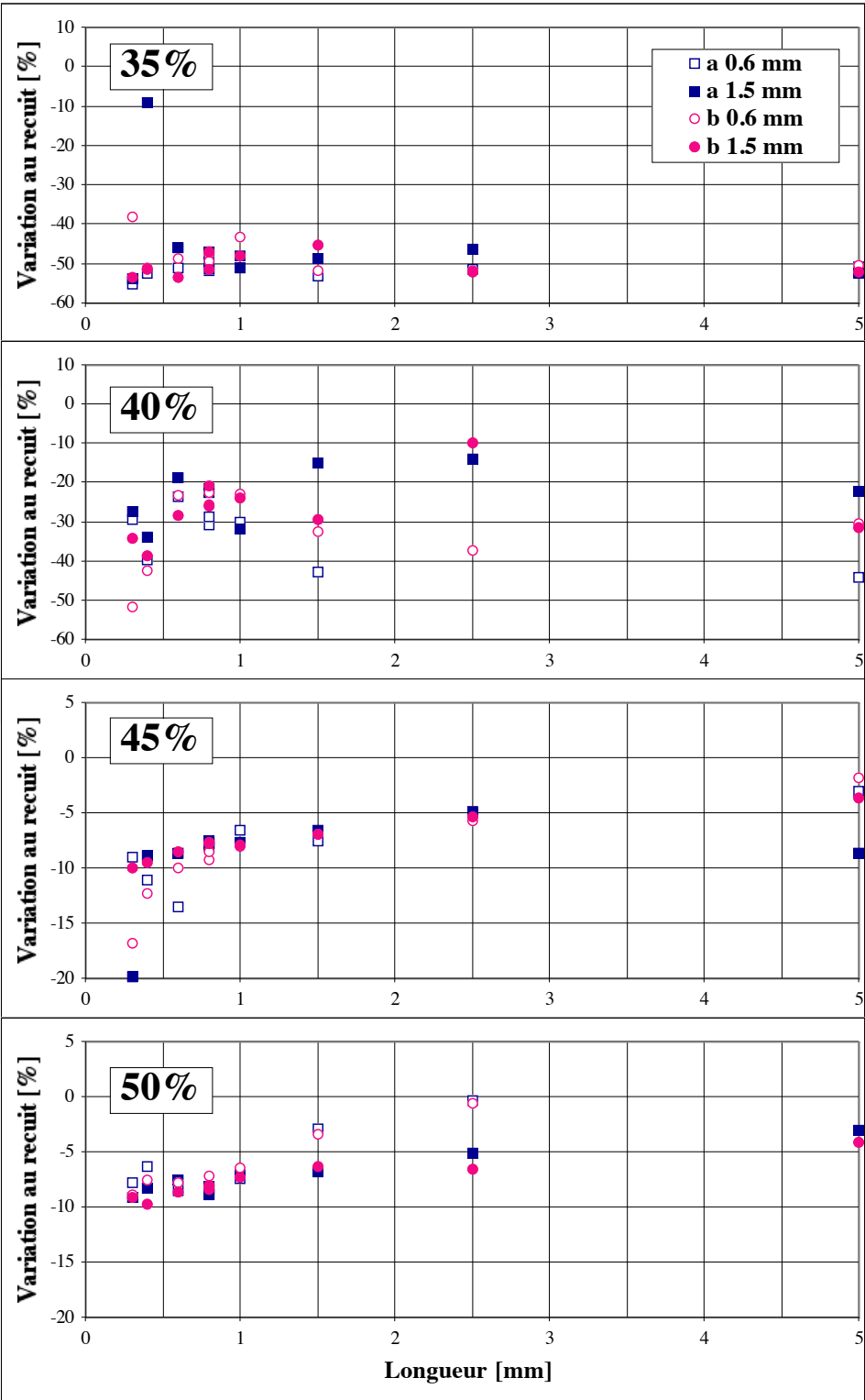


Figure 3-4. No 6 : variation, lors de la cuisson du verrage, des résistances ajustées, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.

Résistances : DP 2041 (325 mesh / 40 μ m) ; a) ESL 9912(Ag) ; b) ESL 9695 (Ag:Pd 25:1).

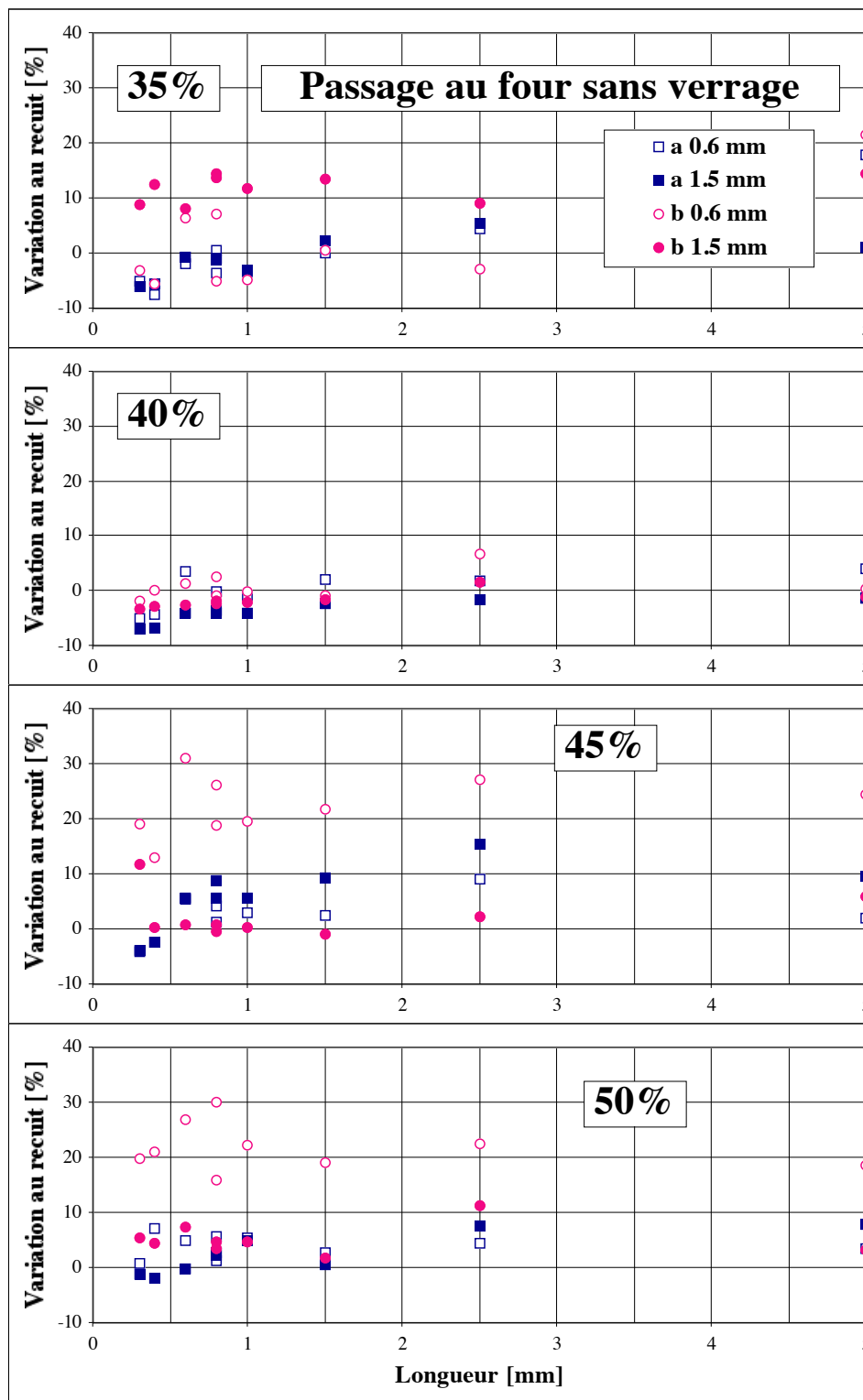


Figure 3-5. No 3 : variation, lors de la cuisson seule (sans verrage), des résistances ajustées, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
Résistances : DP 2041 (325 mesh / 20 μ m) ; a) DP 5104 (Ag:Pd 3:1) ; b) DP 5744 (Au).

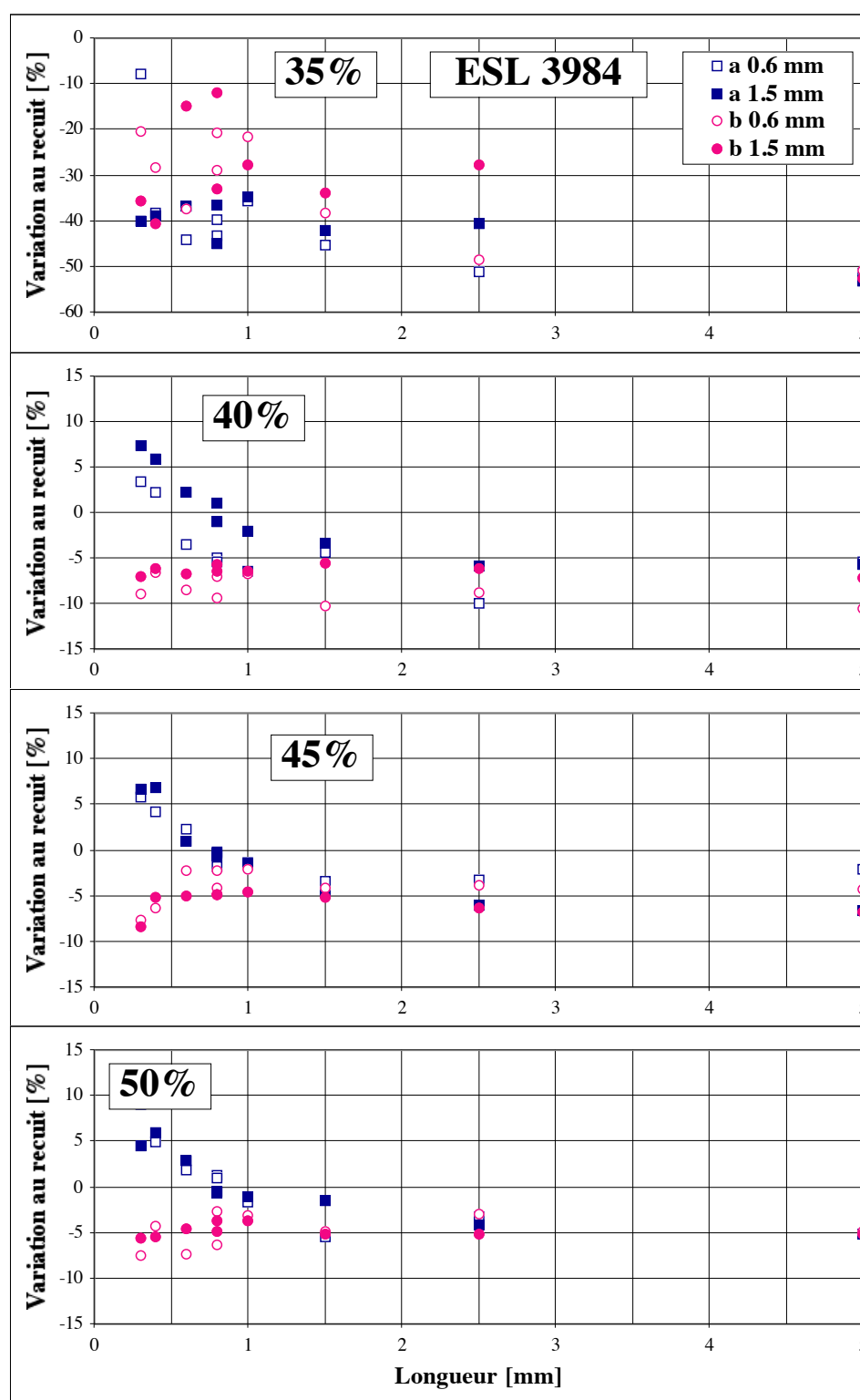


Figure 3-6. No 1 : variation, lors de la cuisson du verrage, des résistances ajustées, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
 Résistances : ESL 3984 (200 mesh / 30 μ m) ; a) ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) ; b) ESL 8837 (Au fin).

3.5. Stabilité sous conditions ambiantes de DP 2041 après ajustement

Lors de cette étude, il a été constaté que les résistances variaient quelque peu déjà sous conditions ambiantes après ajustement. Cette variation est reportée à la fig. 3-7, en fonction de la puissance laser et de la géométrie de la résistance et pour deux temps après l'opération d'ajustement : env. 5 et 10 min. Comme valeur de base, on a utilisé une mesure de la résistance env. 200 ms après son ajustement. Ces résistances sont ajustées à l'état recouvert de verrage.

Cette dérive des résistances après ajustement est probablement due à la progression de microfissures, car elle est toujours positive (aux erreurs de mesure près) et elle tend à augmenter avec la puissance laser et l'agressivité de la coupe. Elle se produit rapidement, vu que l'évolution entre 5 et 10 min est quasi nulle. Cependant, une évolution ultérieure plus importante est à escompter en cas de sollicitations ultérieures telles que traitements ou chocs thermiques.

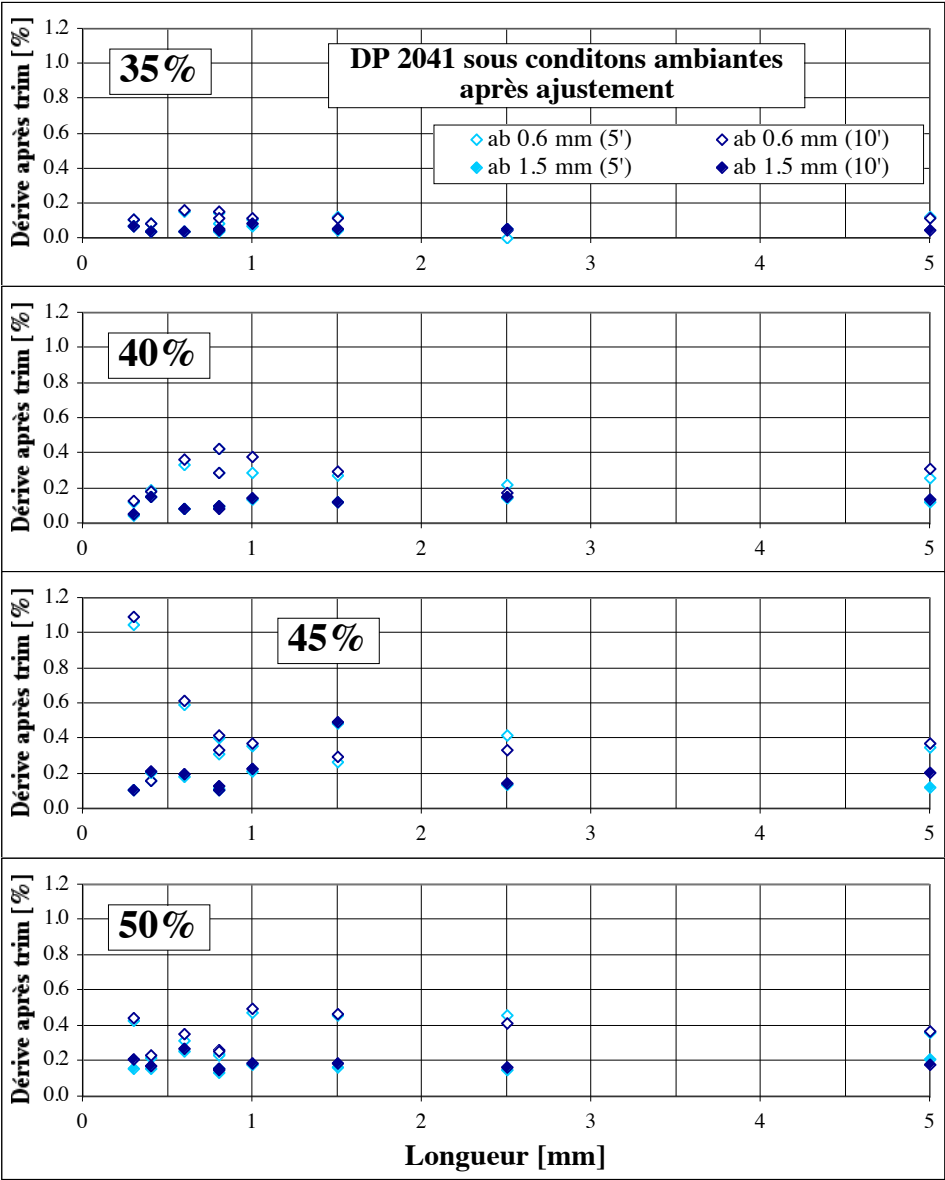


Figure 3-7. No 2 : dérive des résistances (moyenne de a et b) après ajustement laser, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur et du nombre de carrés avant ajustement.
Résistances : DP 2041 (325 mesh / 20 μ m). Dérive sous conditions ambiantes.

4. Conclusions

Cette étude visait à établir grossièrement les conditions pour réaliser des ajustements relativement stables lors du verrage, en tant que base pour les développements en cours à l'IPM (poutres MilliNewton, SenCycle et produits dérivés), ainsi que pour des études ultérieures plus systématiques et complètes.

Les résultats obtenus ici permettent déjà de conclure qu'il est possible de réaliser des ajustements assez stables au verrage, et que cette méthode est donc une bonne manière de stabiliser l'ajustement grossier d'un pont. De plus, les coupes choisies dans cette étude étaient volontairement agressives : 2x la valeur initiale sur des résistances de grande valeur et en laissant parfois de faibles largeurs résiduelles (200 μm). En pratique, l'ajustement est soit nettement moins important ($\leq 20\%$ sur les résistances inertes d'un demi-pont), soit réalisé sur des résistances de beaucoup plus faible valeur, supposées plus stables ; on devrait donc obtenir de nettement meilleurs résultats.

Cependant, certaines précautions doivent être prises pour éviter une forte altération de l'ajustement lors de la cuisson du verrage.

- Comme dans le cas de l'ajustement classique, des coupes peu agressives (en L) sur des résistances de grande surface donnent les meilleurs résultats (si la puissance de coupe est suffisante).
- Il semble que l'optimum de puissance de coupe est décalé vers le haut par rapport à un ajustement classique. Les coupes réalisées dans cette étude à faible puissance ont une apparence propre, mais tendent à se "comblent" électriquement lors de la cuisson du verrage. Ce phénomène est lié à la présence du verrage – il n'est pas observé lors du traitement thermique seul, mais ses causes sont inconnues.
- Inversement, une coupe trop forte crée un endommagement entraînant une augmentation de la résistance déjà à température ambiante, qui se renforce ensuite lors de la cuisson du verrage. Cet effet peut cependant être diminué si on dispose d'une grande surface de résistance et si on optimise la coupe.
- Avec des conditions de coupe favorables, les effets de terminaison sont semblables à ceux observés au verrage de résistances non ajustées : ils ne devraient donc pas perturber trop l'ajustement de ponts de mesure.

Perspectives

Ces résultats serviront de base à des études plus complètes et systématiques.

- On étudiera (sur Al_2O_3) la famille DP 20x1 (2021, 2031, 2041 et 2051 ; 100 Ω à 100 k Ω), ainsi que de la résistance PTC ESL 2612, ce qui donnera une bonne base pour l'ajustement des capteurs. Pour DP 2041, la composition piézorésistive utilisée en standard pour les ponts de mesure, cette étude sera aussi réalisée sur ZrO_2 .
- On étudiera aussi le double verrage (verrage – ajustement – verrage), qui est peut-être moins sensible à l'effet de "comblement" de la coupe observé à faible puissance avec le verrage simple. Deux faits parlent en sa faveur : d'une part, c'est un processus industriel utilisé pour la fabrication de résistances chip (et ESL G-481 est adapté à cette application) et, d'autre part, Huba Control utilise indirectement ce processus avec succès lors de la fabrication des membranes assemblées par verre de scellement. Dans ce dernier cas, la 1^{ère} couche de verrage est constituée de DP 9137 (verrage cuit vers 500°C), et la 2^{ème} par le verre de scellement (cuisson vers 450°C).
- D'autres verrages seront examinés. Notamment, il convient d'étudier dans quelle mesure l'effet de comblement est commun à tous les verrages ou spécifiques à certains, dont ESL G-481.
- La coupe sera étudiée plus attentivement, dans le but de trouver un concept minimisant l'endommagement dû aux puissances trop élevées et l'effet de comblement observé avec les puissances trop faibles. Il est possible d'étudier ces effets séparément, en coupant entièrement une résistance (comblement), ou en faisant une coupe longitudinale (endommagement des bords).